

Olaf Krieger,  
Andreas Breuer,  
Tobias Müller

**Intelligente Fahrzeugdiagnose mit variabler Prüfstrategie**

Braunschweig : Institut für Regelungstechnik  
Wolfsburg : Volkswagen AG

Veröffentlicht: 18.08.2008

<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00022945>

Auch erschienen in:  
Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen, Expert Verlag,  
2008, ISBN 978-3-8169-2821-8

# Intelligente Fahrzeugdiagnose mit variabler Prüfstrategie

---

Olaf Krieger, Andreas Breuer, Tobias Müller

## Abstract

This article introduces a system for the diagnosis of electrical systems in vehicles. The system utilizes probability based detection of failure causes based on Bayesian Networks. Test steps for concluding to the failure cause are generated automatically for each failure candidate. These test steps will then be combined to a sequence leading to a cost and time optimal failure search. The specialty of the utilized methods is that they are independent of manually built expert knowledge bases like it is utilized in nowadays systems. This article shows how the diagnosis system can take information about the individual vehicle and its specific variant into account. Thus the system is able to deliver a more exact diagnosis and more precise test steps than nowadays systems do.

## Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein System zur Diagnose elektrischer Systeme im Fahrzeug. Zur Ermittlung der Fehlerkandidaten kommt ein wahrscheinlichkeitsbasiertes Verfahren auf Basis von Bayes-Netzen zum Einsatz. Ausgehend von den Fehlerkandidaten werden automatisch Prüfanweisungen zur Eingrenzung der Fehlerursache generiert und zu einer Sequenz kombiniert, die eine kosten- und zeitoptimale Fehlersuche ermöglicht. Eine Besonderheit der eingesetzten Verfahren ist, dass sie ohne vorher erstelltes Expertenwissen (wie es bei heutigen Systemen üblich ist) auskommen. Im Beitrag wird gezeigt, wie das Diagnosesystem fahrzeugindividuelle und variantenspezifische Informationen automatisch berücksichtigen kann und dadurch in der Lage ist, exaktere Diagnosen und präzisere Prüfanweisungen ausgeben zu können, als dies heute möglich ist.

## 1. Einleitung

Die meisten elektrischen Systeme sowohl in der Fahrzeugtechnik als auch allgemein in der Automatisierungstechnik sind eigendiagnosefähig. Darunter wird im Folgenden verstanden, dass sie Störungen im System selbstständig erkennen, protokollieren und kommunizieren können. Im Bereich der Fahrzeugtechnik werden unter dem Begriff „On-Board-Diagnose“ (vgl. [1]) alle Diagnosefunktionalitäten zusammengefasst, die im Fahrzeug umgesetzt sind. Dazu gehören vor allem Verfahren zum rechtzeitigen Erkennen von Fehlern in der Fahrzeugelektrik und verschiedenen mechatronischen Systemen. Dafür werden z.B. alle von Sensoren eingelesenen Signale dahingehend überwacht, ob sie innerhalb des zulässigen Bereiches liegen und ob sie plausibel zu anderen bekannten Systemzuständen sind. Bei komplexeren Systemen, wie z.B. der Regelung des Verbrennungsprozesses im Motor werden darüber hinaus modellbasierte Diagnoseverfahren eingesetzt [2].

Im Gegensatz zur Eigendiagnose (On-Board-Diagnose) versteht man unter Off-Board-Diagnose-Systemen eine Klasse von Systemen, die im Bedarfsfall z.B. in der Werkstatt an ein Fahrzeug angeschlossen werden und von außen über eine Datenverbindung auf die Systeme im Fahrzeug zugreifen. Sie haben die Möglichkeit, die Ereignisspeichereinträge (DTC<sup>1</sup>) aller Fahrzeugsysteme auszulesen und dem Mechaniker in einer lesbaren Form anzuzeigen. Des Weiteren kann über diese Geräte auf zusätzliche Diagnosedienste der einzelnen Steuergeräte zugegriffen werden. Dadurch ist es unter anderem möglich, einzelne Messwerte von Sensoren abzufragen, Stellglieder (Aktoren) gezielt anzusteuern oder die Software bzw. deren Konfiguration zu aktualisieren.

Leistungsfähige Diagnosesysteme sollen dem Mechaniker nicht nur alle Informationen aus den einzelnen Steuergeräten anzeigen, sondern ihn bei der Fehlersuche aktiv unterstützen. Das bedeutet, dass sie dem Mechaniker sinnvolle Prüfungen vorschlagen und am Ende die fehlerhafte Komponente und mögliche Reparaturempfehlungen ausgeben können. Ein System, welches dies ermöglicht und im Kundendienst von Volkswagen eingesetzt wird, ist die Geführte Fehlersuche (GFS). Die GFS verwendet von Experten erstellte Fehlersuchprogramme, die genau auf die Fehler, die in einem bestimmten Fahrzeug auftreten können, abgestimmt sind. Dabei ist es notwendig, für jeden möglichen DTC ein Fehlersuchprogramm zu erstellen. Eine besondere Schwierigkeit besteht dabei in der Abdeckung aller Varianten eines Fahrzeugs bzw. Fahrzeugsystems. Die Varianten entstehen durch die zahlreichen Ausstattungsmöglichkeiten, aus denen ein Kunde bei der Fahrzeugbestellung auswählen kann. Dies ist bei der Erstellung der Fehlersuchprogramme zu berücksichtigen, da sich Fehler in unterschiedlichen Fahrzeugvarianten unterschiedlich darstellen und auch Prüf- und Reparaturanweisungen stark variieren können.

## 2. Herausforderung

Die Variantenvielfalt ist vor allem im Bordnetz eines Fahrzeugs sichtbar. Fehler wie Leitungsunterbrechungen, Kurzschlüsse oder Wackelkontakte können nur sicher gefunden werden, wenn das Bordnetz exakt beschrieben ist. Für die manuelle Suche nach Fehlern dieser Art ist für einen Fachmann ein exakter Stromlaufplan das wichtigste Hilfsmittel. Das notwendige Fachwissen vorausgesetzt, kann er darin erkennen, welche Komponenten durch einen Defekt das bestehende Fehlerbild hätten hervorrufen können. Auch lässt sich daraus ableiten, welche Messungen notwendig sind, um Fehlerkandidaten zu überprüfen und sie dadurch entweder auszuschließen oder als Fehlerursache zu identifizieren.

Sollte das im Diagnosesystem hinterlegte Wissen nicht oder nur teilweise mit dem zu diagnostizierenden Fahrzeug übereinstimmen, kann das Diagnosesystem nur sehr eingeschränkt bei der Fehlersuche unterstützen. Es ist mit dem bisherigen Verfahren kaum möglich, für jede Fahrzeugvariante eine individuelle Wissensbasis zu erstellen, da dies jeweils einen manuellen Aufwand erfordert. Aus diesem Grund wurde bei Volkswagen nach einem intelligenten Diagnoseverfahren gesucht, welches alle Varianten berücksichtigen kann, ohne dafür auf manuell erstelltes Expertenwissen zurückgreifen zu müssen.

---

<sup>1</sup> DTC – engl. Diagnostic Trouble Code

Vorausgesetzt, dass dem Diagnosesystem ein elektronisch lesbares Äquivalent zum Stromlaufplan vorliegt, wurden Verfahren gefunden, die unter Berücksichtigung physikalischer Gesetzmäßigkeiten selbstständig Fehlerkandidaten ermitteln und dem Servicetechniker schrittweise sinnvolle Prüfungen vorzuschlagen können. In komplexen Systemen wie modernen Fahrzeugen gibt es jedoch auch weiterhin Fehlersituationen, die nur mit Hilfe von Expertenwissen diagnostiziert werden können. Aus diesem Grund können intelligente Diagnosesysteme die manuell erstellten Prüfprogramme aus heutiger Sicht nicht vollständig ersetzen, sie stellen jedoch eine sinnvolle Ergänzung dar.

### 3. Diagnosewissen

Für die Entwicklung eines intelligenten Diagnosesystems galt es einige grundlegende Probleme zu lösen. Zunächst musste ein Weg gefunden werden, für jedes Fahrzeug einen individuellen Stromlaufplan bzw. ein elektronisch lesbares vollständiges Pendant zu generieren. Die Lösung besteht darin, dass für jedes Fahrzeug ein individueller Datensatz erzeugt und über die Lebensdauer des Fahrzeugs aufbewahrt wird. Der Datensatz enthält jeden einzelnen Leitungsabschnitt, alle Steckverbindungen sowie Massepunkte, Klemmstellen, Sicherungen und natürlich alle Steuergeräte sowie Sensoren und Aktoren. Aus dieser Strukturbeschreibung lässt sich jeder Zeit ein vollständiger und fahrzeugindividueller Stromlaufplan oder ein beliebiger Ausschnitt davon generieren. Weitere Informationen, die für das Diagnosesystem benötigt werden, entstehen bereits bei der Fahrzeugentwicklung. Es wird für jede Diagnosefunktion spezifiziert, welchen Teil der angeschlossenen Peripherie sie überwachen und welche Ereignisspeichereinträge mit der Überwachung korrespondieren. Diese Informationen ermöglichen einem Diagnosegerät das Schließen von Fehlersymptomen (Ereignisspeichereinträge) auf mögliche Fehlerkandidaten.

Ein erfahrener Mechaniker weiß, welche Komponenten häufig kaputt gehen und deshalb zuerst überprüft werden sollten und bei welchen ein Fehler sehr unwahrscheinlich ist. Das im Abschnitt 4 vorgestellte wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren kann mit dieser Art von Informationen ebenfalls umgehen. Die notwendigen Daten werden in Form von Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten von der Qualitätssicherung erhoben und können für die Diagnose verwendet werden.

Ein erfahrener Mechaniker kann auch abschätzen, mit welchem Aufwand eine bestimmte Prüfung verbunden ist, und dadurch unter Umständen andere Prüfungen vorziehen, um die Fehlersuchzeit zu verkürzen. Auch dies kann von einem intelligenten Diagnosesystem übernommen werden. Das Wissen über den Aufwand, der sich hinter dem Aus- und Einbau einzelner Komponenten verbirgt, wird bereits zentral ermittelt und dient als Grundlage für die Aufwandsermittlung der Werkstätten. Auch diese Daten können dem Diagnosesystem zur Verfügung gestellt werden.

Alle hier genannten Informationen zeichnen sich dadurch aus, dass sie einfach und vor allem automatisch aus vorhandenen Daten der Entwicklung, der Produktion, des Kundendienstes und der Qualitätssicherung abgeleitet werden können. Ein Diagnosesystem, welches diese Informationen auswerten kann, hat einen enormen Vorteil gegenüber Systemen, die auf Expertenwissen basieren, da der manuelle Erstellaufwand und die Verifikation der Fehlersuchprogramme entfällt.

## 4. Wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung

Die Aufgabe des im Folgenden vorgestellten Verfahrens besteht darin, auf Grund von Wissen über das vorliegende System und bekannten Fehlersymptomen eine mit Wahrscheinlichkeiten gewichtete Liste mit Fehlerkandidaten zu bestimmen. Zu diesem Zweck kommt ein Bayes-Netz zum Einsatz. Bayes-Netze sind ein Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und ermöglichen wahrscheinlichkeitsbasiertes Schließen auf Basis von unsicherem Wissen [3]. Rein mathematisch betrachtet stellen sie ein sehr effizientes Verfahren zur Berechnung von Zustandswahrscheinlichkeiten dar.

Es existieren verschiedene Werkzeuge zum Erstellen und Verwenden von Bayes-Netzen. Für das beschriebene Diagnosesystem wird ein Produkt der Firma HUGIN verwendet. Über eine API greift das Diagnosesystem auf die Funktionen dieser Software zu und kann mit deren Hilfe zur Laufzeit des Programms ein fahrzeug- und problemindividuelles Netz erzeugen und auf dessen Grundlage die erforderlichen Berechnungen in Echtzeit durchzuführen. Zur Bestimmung der Fehlerkandidaten wird für jede elektrische Komponente und jeden potentiell auftretenden Ereignisspeichereintrag ein Knoten mit zwei logischen Zuständen innerhalb des Bayes-Netzes erzeugt. In Bild 1 ist ein einfaches Netz sowie die Benennung der zwei Zustände dargestellt.

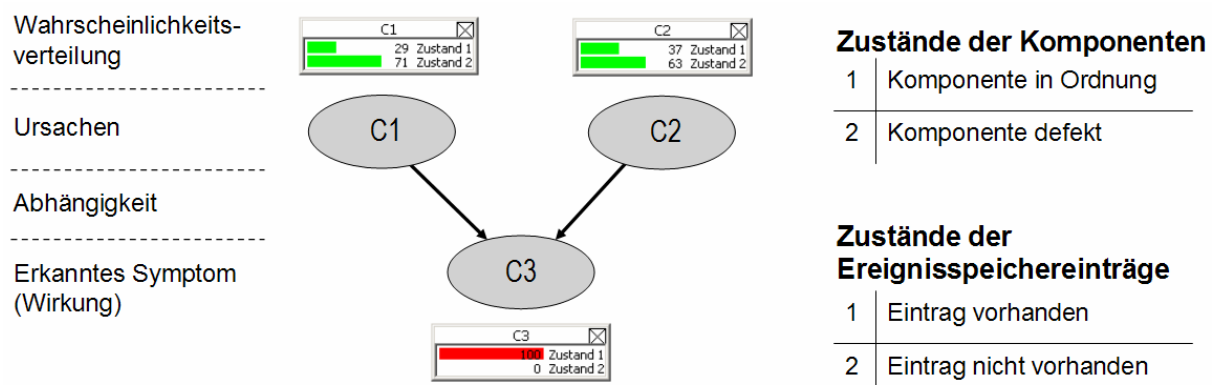


Bild 1: Einfaches Bayes-Netz mit Benennung der Zustände

Die Fenster über bzw. unter den Knoten geben die Verteilung der Zustandswahrscheinlichkeiten an. Die Ereignisspeichereinträge stellen erkannte Fehlersymptome dar. Die Aufgabe des Bayes-Netzes besteht darin, von diesen Symptomen auf die möglichen Ursachen zu schließen. Als Ergebnis berechnet es für jeden Knoten, der eine Komponente repräsentiert, die Wahrscheinlichkeit, mit dem er sich im Zustand „Komponente defekt“ befindet. Bei der Berechnung dieser Fehlerwahrscheinlichkeit werden Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Komponenten berücksichtigt. Ausfallwahrscheinlichkeiten sind statistische Messgrößen der Qualitätssicherung und stellen das Erfahrungswissen des Diagnosesystems dar.

Damit ein Bayes-Netz die Fehlerkandidaten ermitteln kann, ist es notwendig, dass die Informationen über die Struktur des elektrischen Systems (entspricht dem vollständigen Stromlaufplan) sowie die Zuordnung zu den Ereignisspeichereinträgen in das Netz überführt werden. Wie dies genau funktioniert wird im Folgenden an einem Beispiel der Fahrzeugklimaanlage beschrieben.

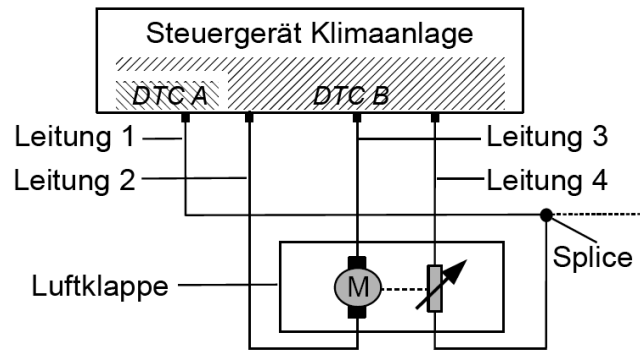


Bild 2: Ausschnitt aus dem Stromlaufplan einer Klimaanlage

Das Bild 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Stromlaufplan einer Klimaanlage. Es sind das Steuergerät und vier seiner Anschlüsse zu sehen, an denen eine Luftklappe (elektro-mechanisches Bauteil) mit Getriebemotor und einem Potentiometer angeschlossen ist. Über die Leitung 1 versorgt das Steuergerät das Potentiometer sowie eine Reihe weiterer Sensoren (nicht dargestellt) mit einer Referenzspannung. Im Falle einer Störung (z.B. Kurzschluss) dieser Spannungsversorgung wird ein Eintrag (DTC A) im Ereignisspeicher abgelegt. Die korrekte Funktion des Motors, des Potentiometers, der Leitungen 2-4 sowie der Mechanik der Luftklappe wird während der Ansteuerung des Motors durch Überwachung der Spannungsänderung vom Potentiometer überwacht. Wird dort ein Fehlverhalten erkannt, wird der Eintrag (DTC B) im Ereignisspeicher generiert.

Die Abbildung zeigt vier überwachte Anschlüsse des Steuergerätes. Alle Komponenten, die an einem solchen Anschluss hängen, werden aus diagnostischer Sicht zu einer Wirkkette zusammengefasst. Das bedeutet, dass sich ein Fehler in diesen Komponenten durch die Überwachungsfunktion hinter diesem Anschluss erkennen lässt.

Bei der Überführung der fahrzeugindividuellen Strukturdaten in ein Bayes-Netz wird zunächst für jede elektrische Komponente und für jeden DTC ein Bayes-Netz Knoten erzeugt. Weiterhin wird für jeden überwachten Anschluss eines Steuergerätes ein Wirkkettenknoten hinzugefügt. Im nächsten Schritt werden die bestehenden Abhängigkeitsbeziehungen in das Bayes-Netz überführt. Das Bild 3 stellt die im Beispiel vorhandenen Abhängigkeiten dar.

Im oberen Teil der Abbildung werden die vorhandenen elektrischen Komponenten den vier Wirkketten zugeordnet. Der untere Teil der Abbildung enthält die Zuordnung zwischen den Wirkketten und den beiden erkennbaren Fehlersymptomen. Liegen zu den elektrischen Komponenten Ausfallwahrscheinlichkeiten vor, werden diese in die Komponentenknoten eingetragen.

Wenn dem Diagnosesystem bekannt ist, dass ein Ereignisspeichereintrag (DTC) vorhanden bzw. nicht vorhanden ist, wird eine Berechnung des Netzes angestoßen. Dies geschieht, indem die Zustandswahrscheinlichkeit eines Symptomknotens auf „Eintrag ist zu 100% vorhanden“ bzw. „Eintrag ist zu 100% nicht vorhanden“ gesetzt wird.

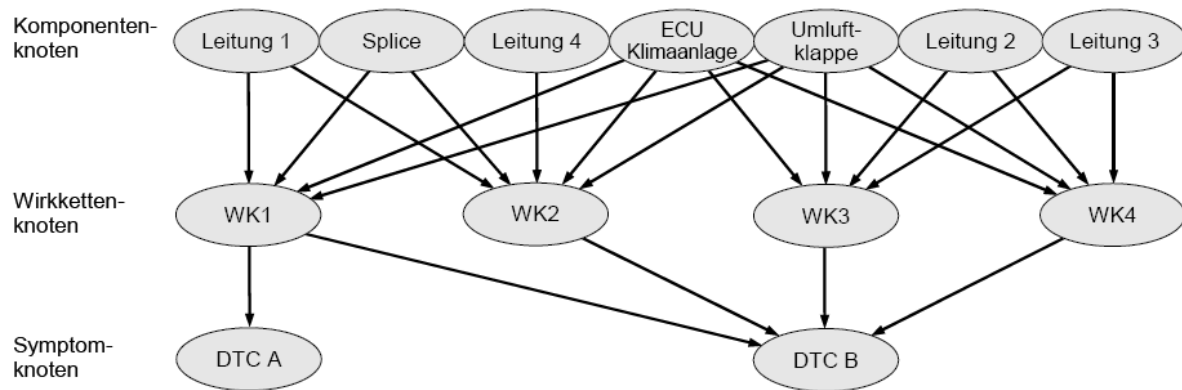


Bild 3: Aus dem Stromlaufplan abgeleitetes Bayes-Netz zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten

Nach dem Berechnungsschritt ändert sich die Fehlerwahrscheinlichkeit der einzelnen elektrischen Komponenten. Wenn, wie im Beispiel, alle Komponenten durch Diagnosefunktionen überwacht werden und kein Ereignisspeichereintrag vorhanden ist, geht die Fehlerwahrscheinlichkeit aller Komponenten auf 0%. Werden ein oder mehr Fehler erkannt, steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit für die Komponenten, die diese Fehler verursachen können.

Ein Bayes-Netz, in der Form wie es in Bild 3 dargestellt ist, ist für komplexe Systeme wie für ein gesamtes Fahrzeug mit weit über 1000 elektrischen Komponenten nicht effizient berechenbar. Die Ursache dafür liegt jedoch nicht in der Anzahl der Knoten, sondern ist in der Komplexität der Abhängigkeiten begründet. Jeder Knoten, der von anderen Knoten abhängt, enthält eine Tabelle mit bedingten Wahrscheinlichkeiten, die in jedem Schritt neu berechnet werden muss. Die Größe der Tabelle ist abhängig von der Anzahl der Elternknoten und kann, wenn alle Elternknoten gleich viele Zustände haben, mit Formel (1) berechnet werden. Wenn die Anzahl der Elemente aller Tabellen mit bedingten Wahrscheinlichkeiten eines Netzes addiert werden, spricht man von der „total CPT<sup>2</sup> size“ eines Bayes-Netzes (vgl. [4]). Sie ist ein Maß für den Speicherbedarf und indirekt für den Rechenaufwand, den ein Bayes-Netz zur Berechnung benötigt.

$$CPT = \text{AnzahlZustände}(X) \cdot \text{AnzahlZustände}(\text{Eltern}(X))^{\text{Anzahl}(\text{Eltern}(X))} \quad (1)$$

Eine mögliche Lösung zur Reduzierung der Komplexität besteht darin, weitere Knoten zwischen den Komponenten- und den Wirkkettenknoten einzufügen, die elektrische Teilsysteme repräsentieren. Diese Teilsysteme bestehen aus wenigen Komponenten oder anderen Teilsystemen und besitzen eine geringe Komplexität. Das Netz berechnet dadurch im ersten Schritt nur, in welchem Teilsystem die Ursache liegen kann, um diese danach weiter zu zerlegen. Die Bilder 4 und 5 verdeutlichen dies. Im Bild 4 ist ein beliebiger Ausschnitt aus einem realen Netz dargestellt.

An den Wirkkettenknoten ist jeweils die Größe der CPT angetragen. Im Bild 5 ist dargestellt, dass sich die totale CPT size durch Einfügen von drei weiteren Knoten von 592 auf 120 verringern lässt. Je höher die Komplexität eines Netzes ist, desto größer ist der Effekt, der durch Einfügen zusätzlicher Knoten erreicht werden kann. Es muss jedoch stets sichergestellt werden, dass das Netz weiterhin das gewünschte Verhalten zeigt.

<sup>2</sup> CPT– engl. conditional probability table, dt. Tabelle bedingter Wahrscheinlichkeiten

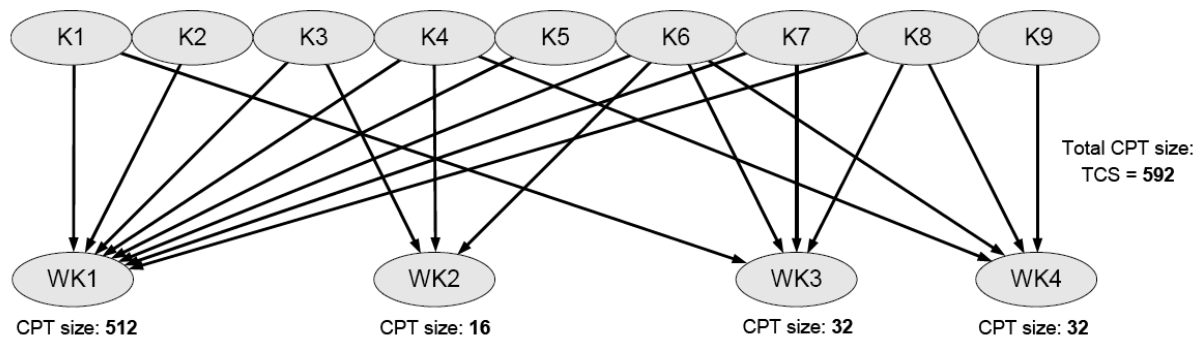


Bild 4: Bayes-Netz zur Verdeutlichung des Optimierungspotentials

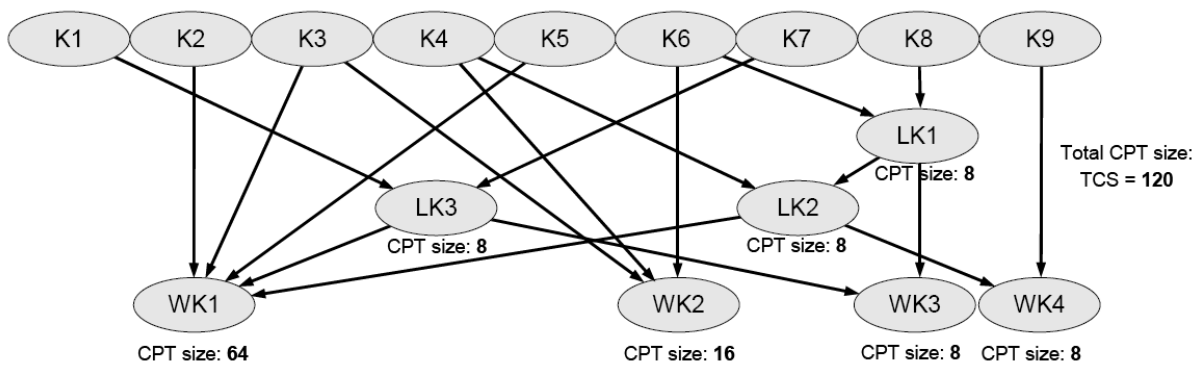


Bild 5: Optimierte Netz

Durch sinnvolle Optimierung kann das Netz die Fehlerkandidaten und deren Fehlerwahrscheinlichkeit auch von sehr komplexen Systemen innerhalb weniger Sekunden berechnen. Seine Stärke kann die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung vor allem bei komplexen Systemen ausspielen, die viele unterschiedliche Fehler erkennen können. Der Ausfall einer Komponente ruft in vielen Fällen mehr als einen Ereignisspeichereintrag hervor. Vor allem bei Störungen der Versorgungsspannung, der Masseverbindungen sowie der Datenbusse kann der Fehler einer einzelnen Komponente Fehlermeldungen in verschiedenen, scheinbar unabhängigen Komponenten hervorrufen. Das Bayes-Netz ist in diesem Fall in der Lage, sehr hilfreiche Aussagen zu treffen. Bei Komponenten, die durch mehrere DTCs aus unterschiedlichen Steuergeräten belastet werden, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sie fehlerhaft sind. Auf Grund dieser Eigenschaft ist das Diagnosesystem in der Lage, sehr präzise Aussagen bezüglich der Fehlerursache machen zu können, indem es das größte Verdachtsmoment auf eine einzelne Komponente legt, die durch das gegebene Symptombild die höchste Fehlerwahrscheinlichkeit hat. Wenn im Rahmen der Fehlersuche erkannt wurde, dass eine bestimmte elektrische Komponente nicht fehlerhaft ist, kann dieses Wissen dem Bayes-Netz mitgeteilt werden, indem der Zustand der Komponente auf 100% „Komponente in Ordnung“ gesetzt wird. Nach einer Neuberechnung des Netzes ergibt sich dann eine Veränderung der gewichteten Fehlerkandidatenliste. Da diese Berechnung auf handelsüblicher Hardware weniger als eine Sekunde benötigt, kann die Neuberechnung nach jedem Prüfschritt durchgeführt werden.



## 5. Dynamischer Prüfplan

Die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung ist bereits eine große Hilfe bei der Eingrenzung der Fehlerursache. Sie wird jedoch den Anforderungen an ein intelligentes Diagnosesystem, wie zu Beginn dieses Beitrags zusammengefasst, nur zum Teil gerecht. Ein solches intelligentes Diagnosesystem soll selbstständig Prüfungen ermitteln und dem Servicetechniker vorschlagen können. Darüber hinaus soll es die Prüfergebnisse auch selbstständig interpretieren und dadurch auf die Ursache des Fehlers schließen können.

Um dies zu erreichen, wird die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung mit einem dynamischen Prüfplan und Prüfgeneratoren erweitert. Ein dynamischer Prüfplan verhält sich aus Sicht des Anwenders ähnlich dem starren Ablauf eines Fehlersuchprogramms mit dem Unterschied, dass jeder einzelne Prüfschritt zur Laufzeit ermittelt wird, und dass der Anwender selbst Einfluss auf den Prüfablauf nehmen kann. Um dies zu realisieren sind folgende Schritte notwendig:

1. Generierung von Prüfanweisungen (elektrische Messungen),
2. Ermittlung der Effektivität jeder einzelnen Prüfung,
3. Auswahl der effektivsten Prüfung und
4. Auswertung des Prüfergebnisses und Ermittlung des nächsten Prüfschritts.

Besonders vielversprechend für die automatische Generierung von Prüfungen sind solche zur Ermittlung von Kupferfehlern im Bordnetz. Diese beinhalten alle elektrischen Verbindungen, wie fehlerhafte Leitungen, Stecker, Verschraubungen sowie Fehler in der Energieversorgung und in Datenbussen. Die automatische Generierung dieser Prüfungen erfolgt auf Basis der elektrischen Strukturbeschreibung, die einem vollständigen Stromlaufplan entspricht. Zur Eingrenzung von Kupferfehlern kennt das Diagnosesystem vier grundlegende Messungen:

1. Durchgangsprüfung zwischen zwei Trennstellen (Stecker, Klemmstellen),
2. Spannungsprüfung gegen Fahrzeugmasse,
3. Überprüfung der Masseverbindung (Durchgangsprüfung gegen Masse),
4. Spannungsmessung zwischen zwei Pins eines Steckers.

Durch geschickte Anwendung dieser vier Messungen ist es möglich, nahezu alle Kupferfehler in einem Fahrzeug zu finden. Am simpelsten ist der Algorithmus zum Ermitteln von Durchgangsprüfungen. Er wird im Folgenden an einem Beispiel erläutert. Das Bild 6 zeigt einen Ausschnitt aus einem Stromlaufplan, der ein Steuergerät, zwei Aktoren, vier Leitungen, vier Steckern und einen Splice (Knotenpunkt) enthält. Es sollen alle Durchgangsprüfungen zur Überprüfung von Leitung 2 ermittelt werden. Dafür läuft der Algorithmus ausgehend vom Fehlerkandidaten in beide Richtungen und ermittelt alle möglichen Paarungen, die jeweils aus einem Messpunkt oberhalb und einem Messpunkt unterhalb des Fehlerkandidaten bestehen.

Bei Verzweigungen, wie dem abgebildeten Splice, werden alle Zweige vollständig abgelaufen. Der Algorithmus stoppt, sobald er auf eine aktive Komponente stößt. Dies sind in diesem Fall das Steuergerät sowie die Aktoren. Die folgenden vier Paarungen werden ermittelt: B-C, B-D, A-C, A-D. Jede dieser Paarungen stellt eine mögliche Durchgangsprüfung dar.

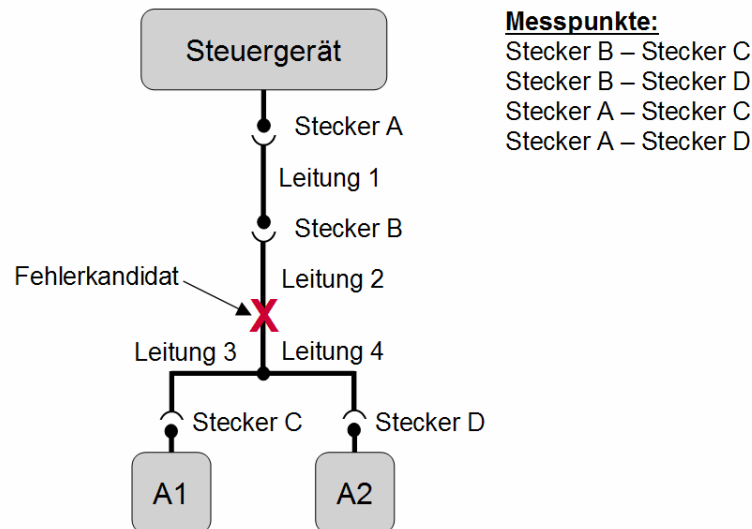


Bild 6: Ermittlung von Messpunkten zur Prüfung von Leitung 2

Der Algorithmus führt diesen Schritt für jeden der ermittelten Fehlerkandidaten durch. Doppelt auftretende Prüfungen werden nur einmal abgelegt. Im nächsten Schritt wird für jede Prüfung ermittelt, welche Komponenten sie prüft. Für die Durchgangsprüfung zwischen dem Stecker A und dem Stecker C sind dies, neben der Leitung 2 und den beiden Steckern, die Leitung 1, die Leitung 3, der Stecker B und der Splice.

Die Ermittlung von Spannungs- und Masseprüfungen ist etwas aufwendiger. Zunächst muss dem System bekannt sein, was für Spannungen an den einzelnen Messpunkten überhaupt anliegen sollten. Dafür wird dem Diagnosesystem ein weiterer Datensatz zur Verfügung gestellt. Darin ist für ausgewählte Punkte im Stromlaufplan angegeben, welches Signal dort anliegen sollte und welche Bedingungen dafür erfüllt sein müssen (z.B. Zündung eingeschaltet). So wird z.B. angegeben, dass am Pluspol der Batterie immer eine Spannung zwischen 10 und 14 Volt gegenüber der Fahrzeugmasse gemessen werden muss. Diese Information wird innerhalb des Stromlaufplans verbreitet, so dass an allen Messpunkten, die über einen direkten Kupferpfad (Sicherungen zählen mit dazu) mit dem Pluspol der Batterie verbunden sind, das gleiche Signal angetragen wird. Nach dem gleichen Prinzip wird mit den Masseverbindungen verfahren. Dadurch ist dem Diagnosesystem bekannt, an welchem Pin eines Steckers Versorgungsspannung und Masse anliegen sollte.

Der in Bild 7 dargestellte Ausschnitt aus einem Stromlaufplan zeigt ein Steuergerät, an dem normalerweise drei Sensoren angeschlossen sind. Die eingezeichneten Messgeräte stellen sechs Prüfschritte dar, die nacheinander zur Überprüfung der Spannungsversorgung der Sensoren durchgeführt werden können. Dem Diagnosesystem ist bekannt, dass über den Pin 2 die Spannungsversorgung für die Sensoren zur Verfügung gestellt wird. Aus der Strukturbeschreibung wird abgeleitet, an welchem Pin der Sensoren diese Spannung anliegen muss. Das gleiche Prinzip wird verwendet, um die Masseverbindungen zu identifizieren. Aus den somit gewonnenen Informationen lassen sich entsprechende Prüfanweisungen generieren und ausgeben.

Nachdem die Prüfungen aus der Strukturbeschreibung abgeleitet wurden, stehen dem Diagnosesystem neben den Fehlerkandidaten und deren Fehlerwahrscheinlichkeiten eine Liste mit Prüfungen zur Verfügung, von denen jeweils bekannt ist, welche Komponenten sie umfassen.

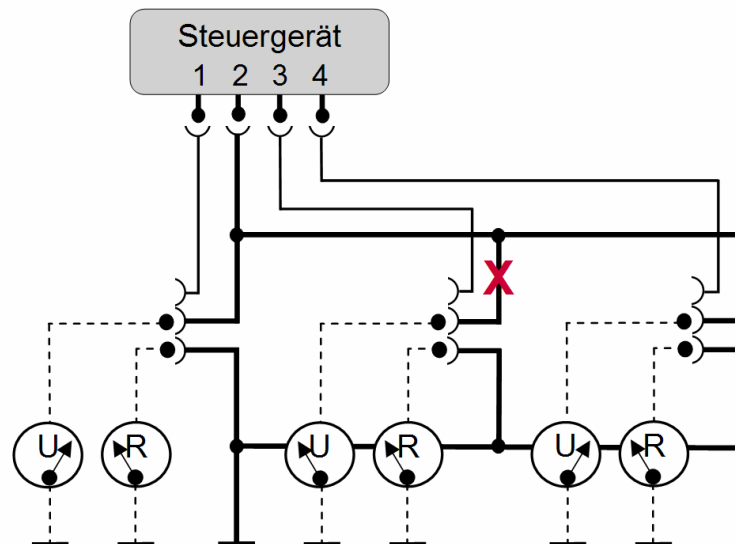


Bild 7: Spannungs- und Durchgangsprüfungen zum Eingrenzen des Fehlerkandidaten

Das Diagnosesystem muss jetzt entscheiden, welche der Prüfungen zuerst durchgeführt werden soll. Dafür wird für jede der verfügbaren Prüfungen ein Effektivitätsgrad ermittelt. Dies geschieht nach Formel 2, Dafür wird zuerst für alle generierten Prüfungen der notwendige Aufwand ermittelt. Dieser setzt sich aus dem eigentlichen Messaufwand und dem Aufwand für den Zugang zu den Messpunkten zusammen.

$$ef(test) = \frac{P(test = fail)}{C(test)} \quad (2)$$

$$P(test = fail) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P(fk_j = nio)) \quad (3)$$

$ef(test)$  – Effektivität eines Tests

$P(test = fail)$  – Wahrscheinlichkeit, dass eine der geprüften Komponenten defekt ist

$P(fk = nio)$  – Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Fehlerkandidat defekt ist

Dabei wird der Aufwand für den Zugang zu einem Messpunkt nur einmal berücksichtigt. Das bedeutet, wenn nacheinander mehrere Messungen an einem Stecker vorgenommen werden, besteht ab der zweiten Messung der Aufwand nur noch aus dem reinen Messaufwand.

Des Weiteren wird für die Ermittlung der Effektivität für jede Prüfung die akkumulierte Fehlerwahrscheinlichkeit nach Formel 3 ermittelt. Diese hängt davon ab, welche Fehlerkandidaten durch die jeweilige Messung geprüft werden und wie hoch die jeweilige Fehlerwahrscheinlichkeit ist. Nachdem ermittelt wurde, welche Prüfung am effektivsten ist, kann das System diese vorschlagen. Der Anwender muss die Prüfungen jedoch nicht in der vom System vorgeschlagenen Reihenfolge durchführen, sondern kann die Prüfungen auch selbstständig auswählen.

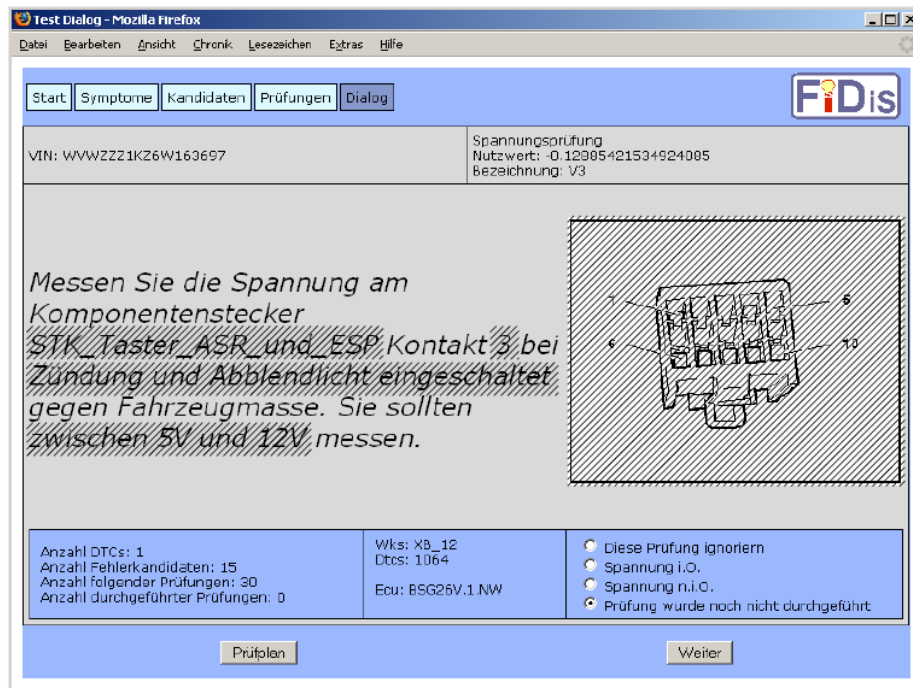


Bild 8: Prüfanweisung einer Spannungsprüfung (schraffierte Elemente wurden zur Laufzeit hinzugefügt)

Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine schrittweise Führung des Anwenders, wie bei der Geführten Fehlersuche, von einem Prüfschritt zum nächsten, jedoch sehr sinnvoll ist. Sobald eine Prüfung ausgewählt wurde, wird vom System eine passende Prüfanweisung generiert. In vielen Fällen ist es hilfreich, wenn die Prüfanweisungen durch zusätzliche Abbildungen ergänzt werden, die z.B. die genaue Belegung der Stecker darstellen. Auch die zu messenden Größen und die Vorbedingungen sollten präzise ausgegeben werden. Bei manuell erstellten Prüfprogrammen werden all diese Informationen von Hand eingegeben. Bei dem beschriebenen dynamischen Prüfplan werden diese Anweisungen automatisch erstellt. Dafür werden parametrierbare Prüfanweisungen verwendet. Diese funktionieren nach dem Prinzip der Templates und enthalten Platzhalter, die erst zur Laufzeit mit den spezifischen Informationen gefüllt werden. Das Bild 8 zeigt eine solche Prüfanweisung. Die schraffierten Bereiche sind Platzhalter, die mit sinnvollen Werten belegt wurden. Aus den ermittelten Prüfungen geht hervor, welche Art von Messung (Spannung, Widerstand, usw.) durchzuführen ist und an welchem Pin des jeweiligen Steckers das Messgerät angeschlossen werden muss. In der Strukturbeschreibung, aus der die einzelnen Prüfungen abgeleitet werden, ist jede Komponente eindeutig über eine Teilenummer identifizierbar. Es existiert eine Liste, die jeder Komponente einen Namen zuordnet. Auch verfügbare Abbildungen werden darüber automatisch zugeordnet.

Nachdem die Messung durchgeführt wurde, gibt der Anwender an, ob die Prüfung bestanden wurde oder fehlgeschlagen ist. Das Prüfergebnis fließt wiederum in die wahrscheinlichkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung ein und führt zu einer Neuberechnung des Bayes-Netzes. Da sich daraufhin sowohl die Fehlerkandidaten als auch die Menge der verfügbaren und noch nicht durchgeführten Tests geändert hat, muss erneut die Effektivität aller Prüfungen ermittelt werden. Wenn im letzten Prüfschritt z.B. ein Stecker freigelegt wurde, wird der damit verbundene Aufwand nicht erneut berücksichtigt. Die Prüfungssequenz endet, wenn der Anwender

durch Messungen die Fehlerursache hinreichend genug eingegrenzt hat und dadurch in der Fehlerkandidatenliste nur noch ein Kandidat enthalten ist.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden zwei Verfahren vorgestellt, die die Leistungsfähigkeit zukünftiger Diagnosesysteme signifikant erhöhen können. Die wahrscheinkeitsbasierte Fehlerkandidatenermittlung versetzt ein Diagnosesystem in die Lage, selbstständig auf Grund von Informationen aus einer elektronisch lesbaren Systembeschreibung von vorhandenen Symptomen auf mögliche Fehlerursachen zu schließen. Unter dem Begriff dynamischer Prüfplan wurde ein Verfahren beschrieben, das eigenständig Prüfanweisungen zur Eingrenzung elektrischer Fehler generiert und sie dynamisch zu einer Prüfsequenz zusammensetzt. Durch die Kombination dieser beiden Verfahren in einem Diagnosesystem kann ein Mechaniker bei der Suche nach elektrischen Fehlern durch eine Abfolge von Prüfanweisungen unterstützt werden. Neuartig bei den hier beschriebenen Verfahren ist, dass dafür keine Fehlersuchprogramme, wie bei heute eingesetzten Systemen, hinterlegt werden müssen. Dadurch, dass die Strukturdaten zu jedem Fahrzeug automatisch generiert werden, kann das Diagnosesystem alle Varianten abdecken, was bei manuell erstellten Fehlersuchprogrammen nur mit großem Aufwand möglich ist.

Der vorgestellte Ansatz ist über den beschriebenen Anwendungsfall hinaus sehr vielversprechend für Systeme, deren Funktion sehr stark durch Software und Mechanik bestimmt wird. Bayes-Netze bieten die Möglichkeit, Beziehungen zwischen verschiedenartigen Teilsystemen wie Softwaremodulen, elektrischen Komponenten und mechanischen Baugruppen abzubilden. Durch die Berücksichtigung der vielfältigen Systemabhängigkeiten, die in modernen mechatronischen Systemen vorhanden sind, können intelligente Diagnosesysteme entwickelt werden, die die Leistungsfähigkeit heutiger Systeme weit übersteigen.

## Literatur

- [1] ISO 15031, Road vehicles - Communication between vehicle and external equipment for emissions-related diagnostics, ISO 2006
- [2] Isermann, R: Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren, Springer 2003
- [3] Heckerman, D; Breese, J; Rommelse, K: Decision-Theoretic Troubleshooting, Communications of the ACM 38, 1995
- [4] Jensen, F.V. Bayesian Networks and Decision Graphs Springer 2001

*Autoren / The Authors:*

M.Sc. Dipl.-Ing.(FH) Olaf Krieger, Volkswagen AG, Wolfsburg

Dipl.-Ing.(FH) Andreas Breuer, Volkswagen AG, Wolfsburg

Dipl.-Ing. Tobias Müller, Institut für Regelungstechnik, TU-Braunschweig